

Rappresentazione del Colore in Applicazioni di Computer Vision e Image Analysis



1. Generalità

La luce visibile è composta da una stretta banda di frequenze dello spettro elettromagnetico, in cui ogni lunghezza d'onda corrisponde ad uno specifico colore. I limiti dello spettro visibile sono dati dal rosso alle basse frequenze e dal violetto alle alte; tra questi due estremi, l'occhio umano è in grado di distinguere circa 400000 colori differenti.

Il colore esprime l'impressione che la luce, variamente riflessa dalla superficie dei corpi, produce sull'occhio: i corpi che riflettono ogni componente della luce visibile appaiono ad un osservatore di colore bianco, mentre, al contrario, quelli che ne assorbono completamente ogni componente risultano neri. Ogni altra lunghezza d'onda riflessa dà luogo alla percezione di uno specifico colore: per esempio un oggetto che riflette la luce con lunghezza d'onda compresa tra 500 e 570 nm, assorbendo tutta l'energia delle altre componenti, appare di colore verde.

ing. Maurizio Montagnuolo
(montagnuolo@eurix.it)

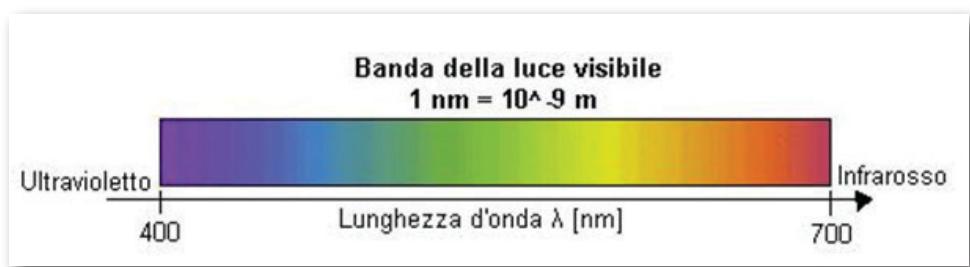
L'articolo sintetizza parte della tesi "Strumenti per la Classificazione Automatica di Contenuti Audiovisivi", Tesi di Laurea **Politecnico di Torino**, 2004, sviluppata presso **Centro Ricerche della Rai**
Relatore: ing. Gianfranco Barbieri
Tutor Rai: ing. Alberto Messina

Sommario

Il colore concorre a definire le proprietà estetiche di un corpo. Il suo studio coinvolge diverse discipline, tra cui l'ingegneria, la fisica, la fisiologia e la psicologia. Dalla confluenza di queste discipline nasce la colorimetria, scienza che si prefigge l'obiettivo di studiare le proprietà del colore e la sua rappresentazione. L'articolo discute degli aspetti fisici, fisiologici e psicologici correlati alla percezione cromatica, fornendo inoltre una descrizione dei modelli matematici utilizzati per la rappresentazione del colore nelle applicazioni di Computer Graphics e Image Analysis.

Rappresentazione del Colore in Applicazioni di Computer Vision e Image Analysis

Fig. 1 - Banda dello spettro elettromagnetico della luce visibile.



Nota 1 - Per la definizione di colori complementari si veda il paragrafo 3.

Nota 2 - La banda dello spettro elettromagnetico della luce visibile è compreso approssimativamente tra 400 e 700 nm, come mostrato in figura 1.

Se le luci dei colori complementari^{Nota 1} vengono mescolate in giuste porzioni, esse producono una luce acromatica (non colorata) che apparirà come un dato grigio. In questo caso la luce è descritta dall'intensità luminosa, considerando una scala di gradazioni di grigio compresa tra il nero (livello minimo) ed il bianco (livello massimo).

La distinzione del colore dipende da fenomeni fisici ed effetti neurofisiologici. Dal punto di vista fisico, essa dipende dalla quantità di energia luminosa che colpisce

la retina; tale energia è espressa analiticamente da una funzione della lunghezza d'onda $E(\lambda)$, mediante la quale è possibile riconoscere le diverse tonalità cromatiche appartenenti alla banda visibile^{Nota 2}.

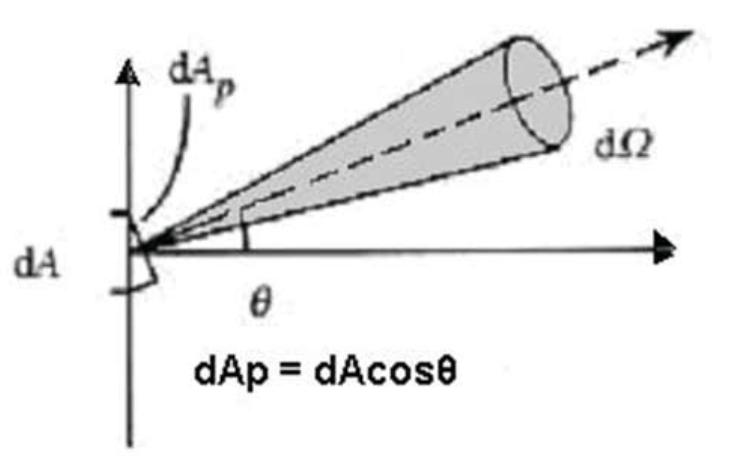
Dal punto di vista psicologico, essa è relazionata a diversi aspetti, comprendenti attributi quantitativi, descriventi le caratteristiche colorimetriche del colore percepito (radianza, brillanza, luminanza, tinta, saturazione), ed attributi soggettivi, dipendenti unicamente dalle esperienze personali dell'osservatore.

Fig. 2 - Si definisce radianza il flusso radiante emesso da una sorgente luminosa per unità di angolo solido ($d\Omega$) e per unità di area proiettata su un piano normale alla direzione di propagazione considerata (dA_p).

2. La Percezione Umana del Colore

L'occhio umano contiene due tipi di cellule fotorecettive: i *coni* e i *bastoncelli*. I coni, che approssimativamente hanno una numerosità di sei milioni, sono responsabili della visione diurna (ovvero ad alti livelli d'illuminazione) e presiedono alla percezione del colore e alla nitidezza dei contrasti, mentre i bastoncelli ammontano a circa 125 milioni ed assolvono la visione notturna (ovvero a bassi livelli d'illuminazione).

Per permettere la distinzione dei diversi colori esistono tre tipi differenti di coni: *S (Short)*, *M (Medium)* ed *L (Long)*, aventi ciascuno sensibilità $S(\lambda)$ rispettivamente



alle lunghe, medie e corte lunghezze d'onda, come mostrato in figura 3. I coni S hanno il picco d'assorbimento intorno ai 440 nm e sono responsabili della visione del colore blu. I coni M presentano il picco di sensibilità nell'intorno dei 540 nm, permettendo la percezione del colore verde. Per i coni L, infine, il picco di sensibilità è collocato nell'intorno dei 580 nm, consentendo la visione del colore rosso.

Dalla figura 3 si può notare come le curve di assorbimento dei coni L ed M siano parzialmente sovrapposte, mentre quella dei coni S risulta ampiamente separata dalle altre due. Inoltre le curve L e M presentano ampiezza di banda (in termini di lunghezza d'onda) notevolmente maggiore della curva S; ciò dipende dal fatto che i coni L e M sono molto più numerosi dei coni S. Di conseguenza, l'occhio umano risulta più sensibile alle tinte rosse e verdi.

Numerosi studi hanno dimostrato che le sensazioni di colore che il cervello umano percepisce sono il risultato della combinazione dei seguenti elementi: la radianza (*radiance*), la luminanza (*luminance*), la brillanza (*brightness*), la tinta (*hue*), e la saturazione (*saturation*).

La radianza (L_e), grandezza radiometrica che rappresenta la quantità totale d'energia che fluisce da una sorgente luminosa. Essa è definita come *“il flusso radiante emesso da una sorgente (estesa) per unità di angolo solido e per unità di area proiettata su un piano normale alla direzione di propagazione considerata”* [1] (figura 2).

$$L_e = \frac{d^2 P_e}{d_p d\Omega} = \frac{d^2 P_e}{d \cos\theta d\Omega} \quad [W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}]$$

La luminanza, grandezza fotometrica, fornisce una misura della quantità d'energia

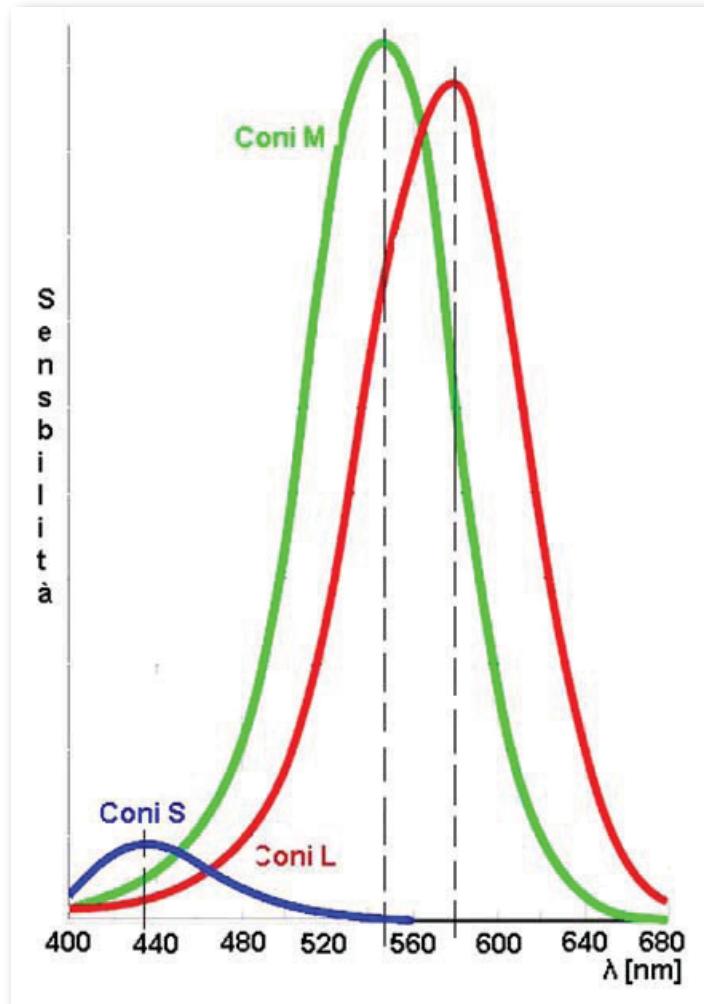


Fig. 3 - Curve di sensibilità dei coni.

prodotta da una sorgente di luce e percepita da un osservatore.

$$L_v = K_m \int_{380}^{780} L_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad [W \cdot m^{-2}]$$

dove K_m è una costante dipendente dal sistema di riferimento utilizzato (nel S.I. $K_m = 683 \quad [W \cdot m^{-2}]$), $L_{e,\lambda}$ indica lo spettro di radianza dello stimolo considerato e $V(\lambda)$ rappresenta la *curva di efficacia luminosa*, funzione della lunghezza d'onda, descrivente la variazione di sensibilità dell'occhio per variazioni monocromatiche.

La brillanza è definita come la quantità totale di luce che appare emessa da una fonte di luce.

La tinta è l'attributo in virtù del quale la sorgente luminosa (o l'oggetto riflettente la luce) è definita rossa, verde, blu, gialla, magenta, ecc. E' determinata dalla lunghezza d'onda dominante (λ_d) emessa dalla sorgente.

La saturazione indica il grado di purezza di un colore, vale a dire quanto esso differisce dalla luce bianca. Le variazioni di saturazione fanno apparire un colore più o meno sbiadito (ad esempio il rosa è meno saturo del rosso). La saturazione è definita come il rapporto tra il flusso luminoso monocromatico dominante e il flusso luminoso totale emesso (o riflesso o trasmesso) dal corpo in esame. La saturazione sarà massima (100%) se il flusso luminoso è monocromatico, mentre sarà minima (0%) se il flusso luminoso è completamente acromatico, ovvero sia grigio.

Nota 3 - Johannes Itten, pittore svizzero vissuto tra il 1888 ed il 1967 [3]

Nota 4 - Philipp Otto Runge, pittore tedesco vissuto tra il 1777 ed il 1810 [4]

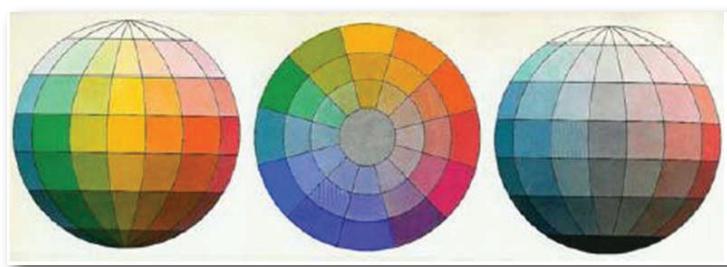
$n = 3$). La descrizione dei colori percepiti si basa, pertanto, sull'associazione di un determinato colore ad una terna di valori numerici, ciascuno dei quali indicante in quale quantità ciascuna caratteristica è presente nel colore stesso.

3. Categorie di Colori e Sensazioni Indotte

L'associazione tra un nome ed un colore permette ad ognuno di noi di creare mentalmente un'immagine del colore cui ci si sta riferendo. Uno dei problemi fondamentali nell'uso di tale tecnica, consiste nel trovare termini comuni a tutte le lingue madri, in grado di distinguere lo stesso colore. Basandosi sull'analisi linguistica relativa a 20 lingue diverse, Berlin e Kay [2] hanno proposto la suddivisione dello spazio dei colori in 11 categorie basilari: Bianco, Nero, Rosso, Verde, Giallo, Blu, Marrone, Rosa, Viola, Arancione e Grigio.

Parallelamente alla standardizzazione della nomenclatura dei colori, diversi ricercatori hanno studiato metodi per la rappresentazione delle emozioni (quali le sensazioni d'azione, rilassamento, divertimento, tensione, calore, ecc...) indotte da un colore in un osservatore. La paternità di questa ricerca è attribuibile a Johannes Itten^{Nota 3}, il quale basandosi sulla teoria di Philipp Otto Runge^{Nota 4}, selezionò dodici tinte fondamentali, e impose cinque livelli di luminanza e tre livelli di saturazione per ogni colore, ottenendo un totale di 180 colori fondamentali, rappresentati sulla superficie di una sfera (figura 4). I 12 colori puri sono posti lungo il cerchio equatoriale, la luminanza varia lungo i meridiani, e la

Fig. 4 - Sfera dello spazio dei colori di Runge-Itten. A sinistra e destra viste esterne; al centro sezione equatoriale. (Immagine tratta da [5]).



saturazione aumenta con l'aumentare del raggio; i colori tra loro opposti sono situati alle posizioni diametralmente opposte.

Questa disposizione permette un'oggettiva identificazione delle peculiarità dei colori, identificando cinque differenti tipi di contrasto [6]:

1. Contrasto di tinta.

Presenta colori non diluiti aventi la loro maggior intensità luminosa. Alcune combinazioni di colore sono: giallo/rosso/blu, rosso/blu/verde, blu/giallo/viola, giallo/verde/viola/blu, viola/verde/blu/arancione/nero. Tinte diverse inducono nell'osservatore sensazioni diverse: i colori gialli, ad esempio, suggeriscono potenza e luminosità, il verde è associato alle piante ed all'estate, mentre il viola è il colore dell'inconscio e del mistero.

2. Contrasto chiaro - scuro.

E' basato sul confronto tra la presenza o l'assenza di luce; differenze di luminosità determinano una differente percezione della profondità.

3. Contrasto caldo - freddo.

I colori o le combinazioni di colore come il giallo, giallo/arancione, arancione e rosso/viola sono convenzionalmente associate ad ambienti caldi, mentre le combinazioni dei colori come giallo/verde, verde, verde/blu, blu, blu/viola inducono una sensazione di freddo.

4. Contrasto complementare.

Due colori sono detti complementari se miscelandoli insieme si ottiene un grigio neutro; esempi sono le coppie giallo/viola, blu/arancione, rosso/verde. Posti uno vicino all'altro determinano nell'osservatore un senso di calma e tranquillità; al contrario, in presenza di due colori non complementari l'occhio umano automaticamente ricerca nell'immagine il complementare del colore osservato,

determinando un senso di angoscia.

5. Contrasto di saturazione.

Si riferisce al grado di purezza di un colore e determina nell'osservatore un senso di tensione.

I descrittori di contrasto sopra citati possono essere utilizzati per definire una rappresentazione semantica del contenuto di un'immagine [9]; ovviamente, tale rappresentazione risulta fortemente condizionata dalla cultura e dalle esperienze individuali.

4. Rappresentazione del colore

4.1 Il Diagramma di Cromaticità CIE 1931

I colori possono essere rappresentati da una combinazione dei tre colori primari rosso, verde e blu.^{Nota 5} Nel 1931 la Commission Internationale d'Eclairage (CIE, un ente incaricato della standardizzazione nel campo dell'illuminazione [7]) propose un modello colorimetrico in grado di rappresentare tutti i colori, fissando inoltre le lunghezze d'onda dei tre colori primari:

- Rosso = 435.8 nm;
- Verde = 546.1 nm;
- Blu = 700 nm.

Il diagramma rappresentativo del suddetto modello, denominato CIE 1931, è mostrato in figura 5, in cui sono rappresentate tutte le cromaticità che l'occhio umano è in grado di percepire, prescindendo dalla luminanza.

La proprietà fondamentale del diagramma CIE 1931 è data dal fatto che sommando tra loro due colori si ottiene un terzo colore; pertanto, variando le proporzioni dei primi

Nota 5 - Questa terna colorimetrica è conosciuta con l'acronimo RGB, dall'inglese *Red, Green, Blue*.

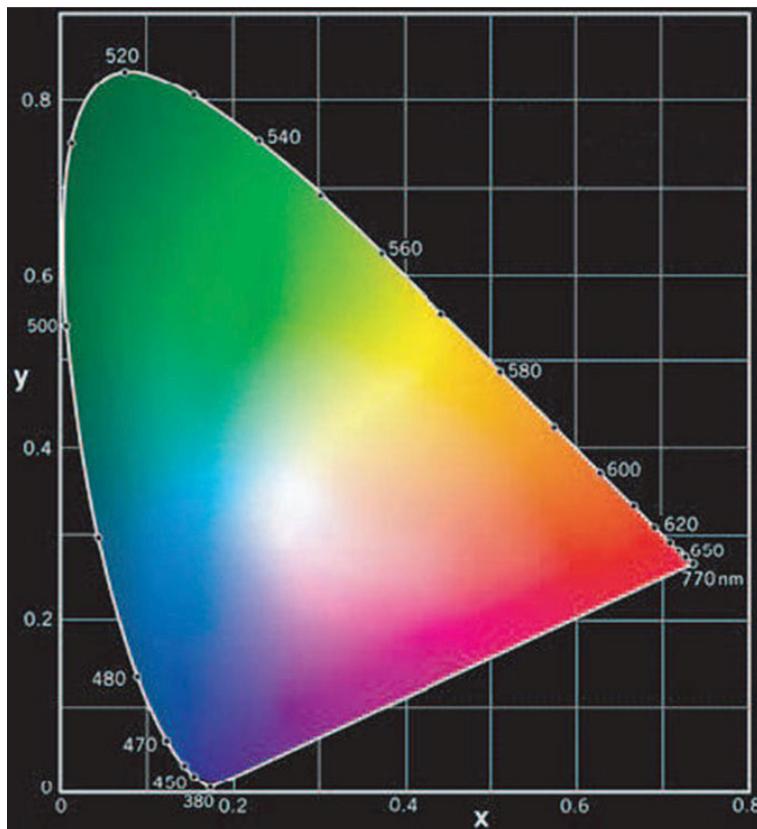


Fig. 5 - Il diagramma di cromaticità CIE 1931.

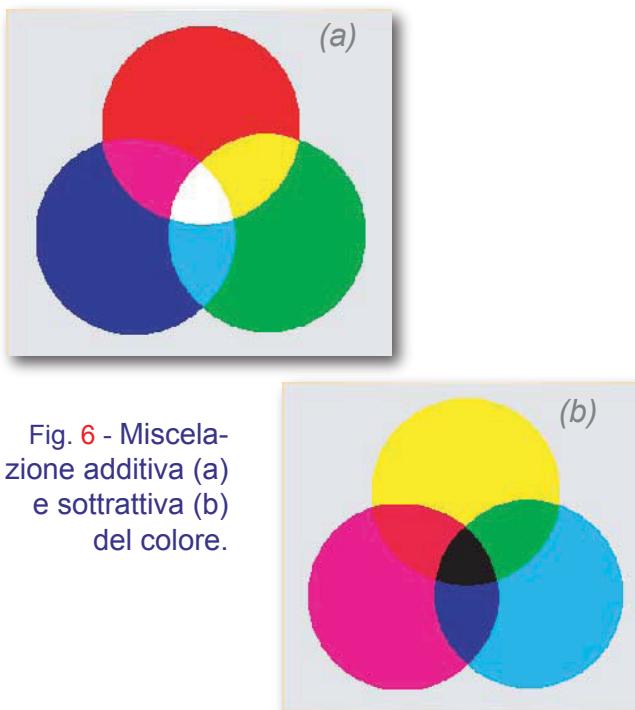


Fig. 6 - Miscela-
zione additiva (a)
e sottrattiva (b)
del colore.

due si ottengono tutti i colori che stanno sul segmento che li unisce. Ad esempio, sommando tra loro le tre componenti fondamentali si ottengono i colori secondari: Magenta (Rosso più Blu), Ciano (Verde più Blu) e Giallo (Rosso più Verde). Miscolando, con le opportune intensità, i tre colori primari, o un secondario con il suo primario opposto, si ottiene il bianco. I risultati di questa tecnica, denominata di miscelazione additiva del colore, sono mostrati in figura 6a.

Ogni colore è quindi identificato dalla terna di valori $Q = (XYZ)$, corrispondente alle coordinate del punto che identifica il colore nel diagramma CIE 1931. Nelle applicazioni pratiche è usuale utilizzare il vettore normalizzato $q = (x, y, z)$, in cui

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X + Y + Z} \\ y = \frac{Y}{X + Y + Z} \\ z = \frac{Z}{X + Y + Z} \end{cases}$$

Poiché vale il vincolo $(x + y + z) = 1$, è infine possibile identificare ogni colore dalla coppia di coordinate ortogonali $q = (x, y)$, in cui viene omesso il termine z , facilmente ricavabile nota la coppia di coordinate (x, y) . Le trasformazioni tra i riferimenti RGB e XYZ sono funzioni lineari, espresse in forma matriciale:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4900 & 0.3100 & 0.2000 \\ 0.1770 & 0.8124 & 0.0106 \\ 0 & 0.0100 & 0.9900 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

Con riferimento ai descrittori di tinta, saturazione e brillanza precedentemente introdotti, è importante far notare che ogni punto situato sul contorno del diagramma identifica un colore completamente saturo;

si ha quindi saturazione massima lungo il contorno, mentre il suo valore decresce sino a zero man mano che ci si avvicina al centro del diagramma. Se si selezionano tre punti del diagramma (corrispondenti ai tre primari), tutti i colori ottenibili tramite una loro combinazione, appartengono al triangolo avente per vertici i tre punti considerati.

Occorre infine precisare che il diagramma di cromaticità è uno strumento utile nella definizione dei colori, ma non apporta alcun contributo nella sua rappresentazione nei dispositivi hardware, né nella visione umana.

4.2 Modelli di Rappresentazione del Colore

I modelli di rappresentazione dei colori possono essere distinti in:

- *Hardware oriented*, definiti in accordo con le proprietà dei dispositivi ottici usati per riprodurre i colori, come i monitori, i video per i computer e le stampanti a colori. Modelli hardware-oriented sono i modelli RGB, CMY, YUV, YIQ. E' difficile per l'utente trattare questi modelli poiché non si riferiscono direttamente alle nozioni di tinta, saturazione e luminosità;
- *User oriented*, basati sulla percezione umana dei colori, presentano la particolarità di essere intuitivi ed uniformi.^{Nota 6} Sono user oriented i modelli HLS, HSV, $L^*u^*v^*$ $L^*a^*b^*$ e $L^*C^*h^*$.

Lo Spazio dei Colori RGB

Nel modello RGB ogni colore è ottenuto come combinazione lineare dei tre colori primari rosso, verde e blu; esso si basa su di un sistema di coordinate cartesiane, in cui il sottospazio dei colori è delimitato da un cubo, come mostrato in figura 7. La

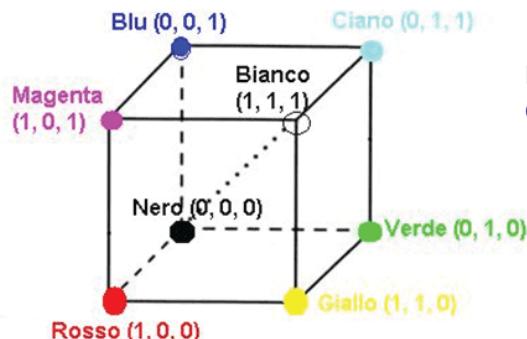


Fig. 7 - Spazio dei colori RGB.

diagonale del cubo che congiunge il nero $(0,0,0)$ con il bianco $(1,1,1)$, rappresenta la scala di grigi, in cui rosso, verde e blu sono presenti nella stessa percentuale. I colori a massima saturazione sono posti sugli spigoli del cubo: alle coordinate $(1,0,0)$, $(0,1,0)$, $(0,0,1)$, $(0,1,1)$, $(1,0,1)$, $(0,1,1)$ si trovano rispettivamente il rosso, il verde, il blu, il ciano, il magenta e il giallo.

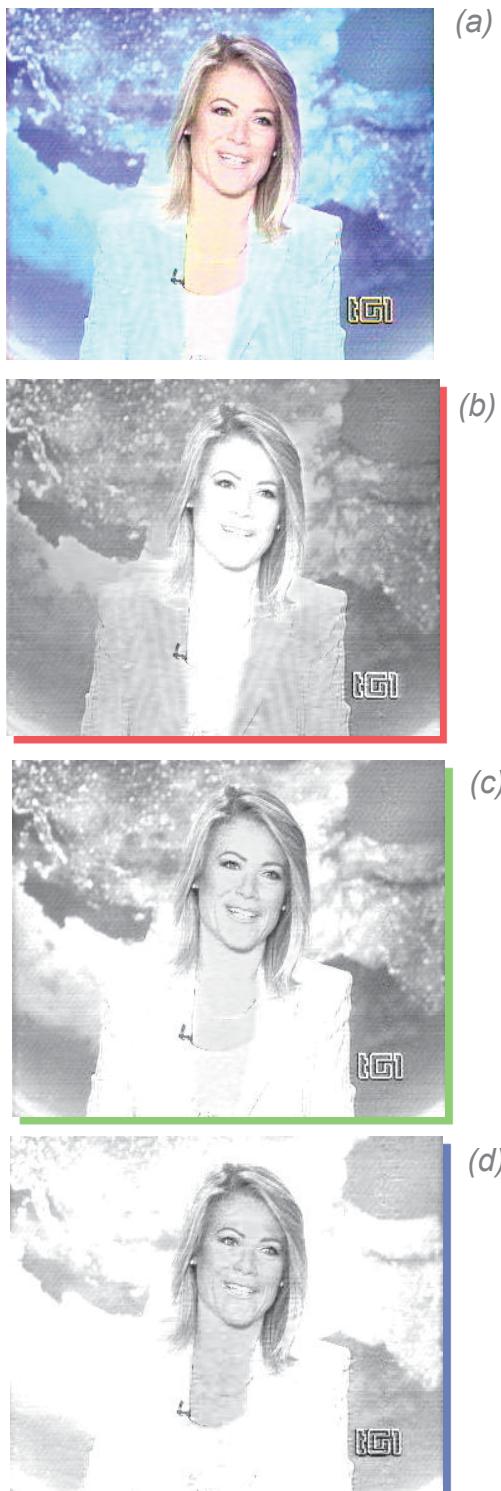
Questo modello è particolarmente importante poiché molti dispositivi hardware forniscono una rappresentazione dei colori basata su di esso.^{Nota 7} In figura 8 è mostrata l'immagine "TG1.jpg" e la sua scomposizione secondo le componenti RGB. Le immagini dei singoli canali R, G e B, codificate in scala di grigi, indicano la quantità di ciascuna componente per ogni pixel dell'immagine originale. Valori di alta luminosità (identificati da pixel prossimi al bianco) indicano che un dato colore primario è presente in percentuale maggiore. Si noti, ad esempio, come nello sfondo dello studio i pixel a maggior luminosità sono quelli del canale blu (figura 8d), mentre nella zona del volto i pixel a maggior luminosità sono quelli del canale rosso (figura 8b).

Nota 6 - Uno spazio dei colori è definito uniforme se, a piccole variazioni dei valori della terna di coordinate corrispondono piccole variazioni del colore percepito.

Nota 7 - Un elenco dei valori RGB per i colori più comuni è reperibile al seguente indirizzo internet <http://astronomy.swin.edu.au/~pbourke/colour/colourspace/>

Rappresentazione del Colore in Applicazioni di Computer Vision e Image Analysis

Fig. 8 - Esempio di rappresentazione nello spazio RGB. (a) Immagine originale. (b) Canale del Rosso. (c) Canale del Verde. (d) Canale del Blu.



Lo Spazio dei Colori CMY

Lo spazio dei colori CMY è usato per la stampa a colori. Ciano (Cyan), Magenta (Magenta) e Giallo (Yellow) sono i complementari del rosso, verde e blu; sono chiamati colori primari sottrattivi poiché ottenuti sottraendo energia luminosa dal bianco, come mostrato in figura 6b. La conversione dallo spazio RGB è ottenuta, assumendo ogni valore dei colori normalizzato nell'intervallo $[0, 1]$, semplicemente sottraendo ad uno i valori della terna RGB, come espresso nell'equazione:

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

Gli Spazi di Colore utilizzati negli Standard Video

YUV e YIQ sono gli spazi di colore utilizzati nelle trasmissioni televisive analogiche. Sono utilizzati, rispettivamente, nel sistema PAL europeo e nel sistema nordamericano NTSC. Y è connesso con il valore di luminanza, mentre U, V e I e Q rappresentano le componenti di crominanza.

Le trasformazioni tra lo spazio RGB e gli spazi YUV e YIQ sono date dai seguenti sistemi lineari:

$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.147 & -0.289 & 0.437 \\ 0.615 & -0.515 & -0.100 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.274 & -0.322 \\ 0.212 & -0.523 & 0.311 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

Un altro spazio caratteristico dei sistemi televisivi è lo spazio YCbCr, in cui Y rappresenta la luminanza, mentre Cb e Cr, rispettivamente, i valori di crominanza del blu e del rosso. Le conversioni dallo spazio RGB dipendono dal tipo di raccomandazione utilizzata. Con riferimento

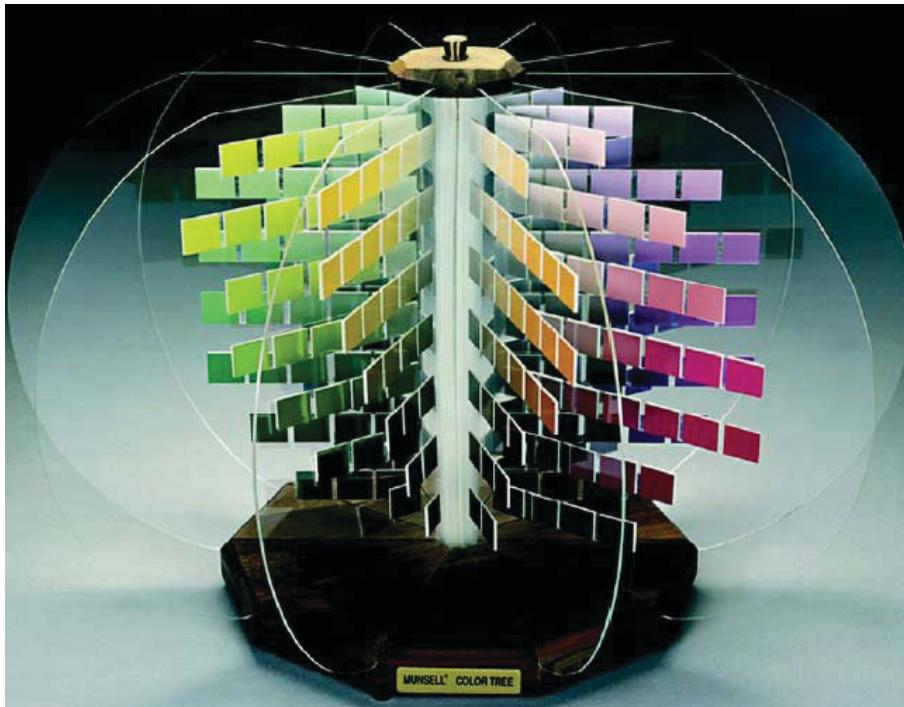


Fig. 9 - Spazio dei colori di Munsell. (Immagine tratta da [8]).

alla raccomandazione internazionale ITU BT.R 601-5, si ha trasformazione espressa dall'equazione.

$$\begin{bmatrix} Y \\ E \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2989 & 0.5866 & 0.1145 \\ -0.1688 & -0.3312 & 0.5000 \\ 0.5000 & -0.4184 & -0.0816 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

Lo Spazio dei Colori di Munsell

Nello spazio dei colori di Munsell, i colori sono organizzati in uno spazio tridimensionale con coordinate cilindriche, in cui ogni dimensione rappresenta le variabili di tinta (*Hue*), saturazione (*Saturation*) e brillanza (*Brightness*).

La tinta è rappresentata da 10 settori circolari rappresentanti le cinque tinte principali (blu, verde, giallo, rosso, viola) e le cinque tinte intermedie (verde-blu, verde-giallo, rosso-giallo, rosso-viola, blu-viola). La saturazione è rappresentata dal raggio della circonferenza considerata sulla ruota dei

colori standard. La *brillanza* è calcolata come una percentuale da 0% (nero) a 100% (bianco).

Con la schematizzazione introdotta, mostrata in figura 9, è possibile rappresentare 550 colori più 11 livelli di grigio.

Gli Spazi dei Colori HSV e HSL

Gli spazi HSV e HSL sono trasformazioni dello spazio RGB che descrivono in modo più naturale il colore. Il nome HSV significa *Hue*, *Saturation*, *Value*, mentre HSL identifica *Hue*, *Saturation*, *Lightness*. I due spazi possono essere rappresentati mediante un singolo e doppio cono, come mostrato in figura 10.

La principale differenza rispetto al modello proposto da Munsell, in cui la luminosità rimane costante per ogni valore di tinta e saturazione, consiste nel fatto che in questi modelli il massimo valore di saturazione ottenibile dipende dal valore di luminosità.

Rappresentazione del Colore in Applicazioni di Computer Vision e Image Analysis

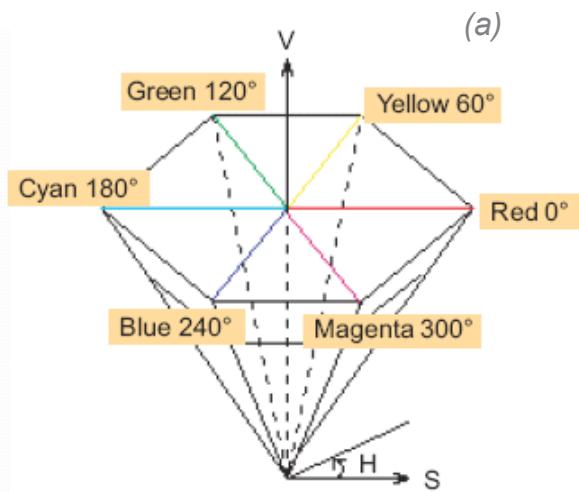


Fig. 10 - Spazi di colore HSV (a) e HSL (b). (Immagini tratte da [8]).

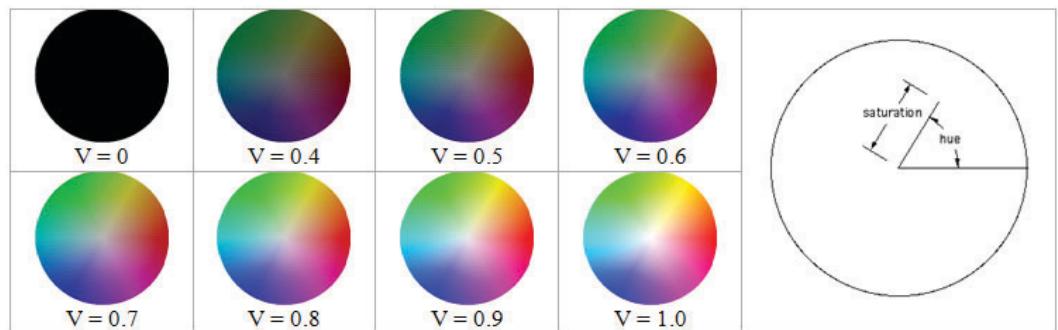
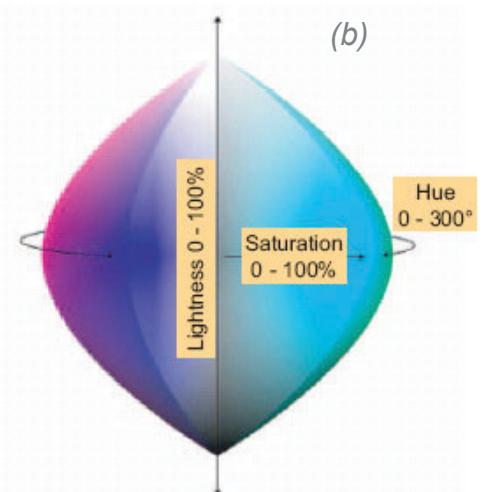


Fig. 11 - Visualizzazione del piano H-S per diversi valori della componente V.

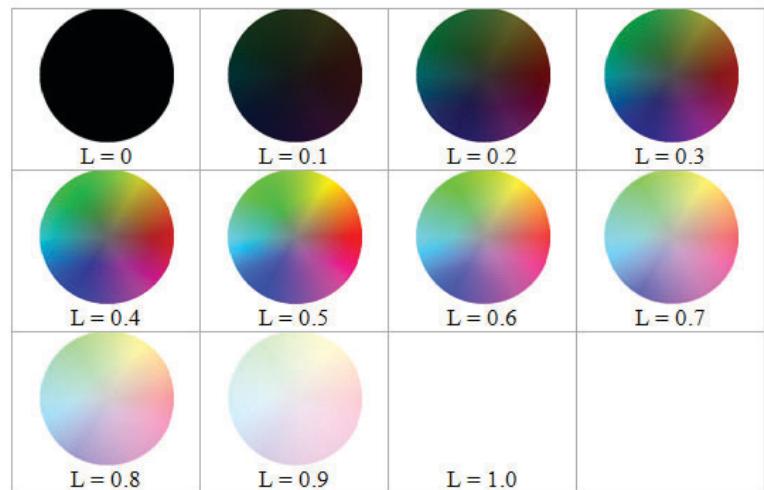


Fig. 12 - Visualizzazione del piano H-S per diversi valori della componente L.

Spesso risulta comodo rappresentare tali spazi su un piano in coordinate polari (r, θ) , indicanti, rispettivamente, la saturazione e la tinta, come mostrato nelle figure 11 e 12.

Uno dei possibili algoritmi di conversione dallo spazio RGB allo spazio HSV opera nel seguente modo:

$$Max = \max\{R, B, G\}$$

$$Min = \min\{R, B, G\}$$

$$V = Max$$

if $(Max \neq 0)$

$$S = \frac{Max - Min}{Max}$$

if $(Max = R)$

$$H = \frac{G - B}{Max - Min}$$

else if $(Max = G)$

$$H = 2 + \frac{B - R}{Max - Min}$$

else

$$H = 4 + \frac{R - G}{Max - Min}$$

else

$$S = 0$$

H = -1 // tinta indeterminata

Nello spazio L*a*b*:

- L* rappresenta la luminanza;
- a* codifica la sensazione rosso-verde, in cui i valori positivi di a* indicano il colore rosso, mentre quelli negativi il verde;
- b* codifica la sensazione giallo-blu, in cui i valori positivi di b* indicano il giallo, mentre quelli negativi il blu.

La trasformazione dallo spazio RGB allo spazio L*a*b* è realizzata effettuando dapprima la trasformazione da RGB a CIE XYZ e successivamente da CIE XYZ a CIELAB secondo le relazioni seguenti:

$$\begin{cases} L^* = 116 \cdot \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 & \text{per } Y/Y_0 > 0.008856 \\ L^* = 903.3 \cdot \frac{Y}{Y_0} & \text{per } Y/Y_0 \leq 0.008856 \\ a^* = 500 \cdot \left[f\left(\frac{X}{X_0}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_0}\right) \right] \\ b^* = 200 \cdot \left[f\left(\frac{Y}{Y_0}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_0}\right) \right] \end{cases}$$

dove:

$$f(t) = \frac{3}{\sqrt[3]{t}} \quad \text{per } t > 0.008856$$

$$f(t) = 7.787t + \frac{16}{116} \quad \text{per } t \leq 0.008856$$

Il modello L*u*v* fornisce una descrizione dei colori basata sulla teoria della visione umana dei colori opposti e cerca di approssimare le differenze tra i colori così come sono percepiti dall'uomo. Le componenti L*u*v* sono ottenute mediante trasformazioni non lineari delle coordinate XYZ nel diagramma CIE 1931:

Gli spazi dei colori

L*a*b*, L*u*v* e L*c*h*

Sono spazi ottenuti mediante trasformazioni non lineari dello spazio XYZ, con riferimento ad un punto particolare che è scelto come bianco.

- la luminanza L^* è basata su misure percettive della luminosità;
- u^* e v^* sono coordinate cromatiche.

I valori di XYZ sono trasformati nelle coordinate $L^*u^*v^*$ mediante le seguenti equazioni:

- per il calcolo di L^* valgono le stesse relazioni usate nel modello L^*a^*b ;

$$\begin{cases} u^* = 3 \cdot L^* \cdot (u' - u'_0) \\ v^* = 3 \cdot L^* \cdot (v' - v'_0) \end{cases}$$

dove $u' = \frac{4X}{X + 5Y + 3Z}$ e $v' = \frac{9Y}{X + 5Y + 3Z}$

Nel modello $L^*C^*h^*$ un colore è rappresentato in termini di luminanza (L), Crominanza (C) e Tinta (h). I valori di c^* e h^* si ottengono a partire dai valori di u^* , v^* e a^* , b^* mediante le trasformazioni:

$$\begin{cases} h^* = \arctan \frac{v^*}{u^*} \\ C^* = \sqrt{u^{*2} + v^{*2}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} h^* = \arctan \frac{v^*}{u^*} \\ C^* = \sqrt{u^{*2} + v^{*2}} \end{cases}$$

Le superfici a crominanza costante sono cilindri con asse L^* , mentre le superfici a tinta costante sono dei piani definiti dagli assi L^* e C^* . Esprimendo questo spazio in coordinate cilindriche si ottiene una rappresentazione simile allo spazio di Munsell, coincidente quasi esattamente con il modello fisiologico adottato per descrivere la visione del colore.

5. Scelta dello Spazio di Colore

L'uso di uno spazio piuttosto che un altro dipende da ciò che l'utente desidera effettuare; la tabella 1 riporta pro e contro degli spazi precedentemente descritti.

6. Riferimenti

1. AA.VV."Misurare il colore: spettrofotometria, fotometria e colorimetria, fisiologia e percezione", a cura di Claudio Oleari, ed. Hoepli, 1998.
2. B. Berlin, P. Kay (1969) "Basic Color Terms. Their Universality and Evolution", Berkeley: University of California Press. Ristampa 1991.
3. Biografia di Johannes Itten (in tedesco) http://www.bauhaus.de/bauhaus1919/biographien/biographie_itten.htm
4. Biografia di Philipp Otto Runge <http://www.spiritus-temporis.com/philipp-otto-runge/>
5. P. Stanchev, D. Green Jr, B. Dimitrov, "High level color similarity retrieval", 28° International conference ICT&P 2003, Varna, Bulgaria.

6. J. Itten, "The art of colors", Reinhold Publishing Corporation of New York, 1961.
7. Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) - <http://www.cie.co.at/>
8. F. Gierlinger, "Colour spaces in modern multimedia environments — convergence after 40 years of colour television", EBU Technical Review, No. 301 (Gennaio 2005).
9. J.M. Corridoni, A. Del Bimbo, P. Pala, "Image retrieval by color semantics", Multimedia Systems, Springer-Verlag GmbH, Volume 7, Number 3, May 1999, pp. 175 - 183

Tab. 1 - Spazi colore.

SPAZIO COLORE	CAMPI APPLICATIVI	CARATTERISTICHE	
		☹	☺
RGB	monitor CRT, telecamere, computer graphics	Non uniforme, non compatto, non lineare, dipendente dal dispositivo, poco intuitivo	Completo, facile da implementare, di uso molto comune
CMY	Stampa e fotografia	Non uniforme, non lineare, dipendente dal dispositivo, poco intuitivo, difficile corrispondenza con RGB	Facile da implementare, trasformazioni lineari dallo spazio RGB
HSL – HSV	Image Processing	Non lineari, dipendenti dal dispositivo	Intuitivi, uniformi
YIQ, YUV	Trasmissioni televisive, compressione ed elaborazione delle immagini	Non uniformi, non compatti, completi, dipendenti dal dispositivo, poco intuitivi	Separazione componenti di luminosità Y e cromaticità, trasformazioni lineari dallo spazio RGB
CIE	LAB, LUV	Image Processing	Poco intuitivi
	LCh	Image Processing	Intuitivo

Glossario

Sono riportate in questo glossario le definizioni delle grandezze più frequentemente utilizzate in colorimetria e descritte in questo articolo. Per ognuna di esse sono riportati, quando possibile, sia il termine in italiano, sia il corrispondente termine in lingua inglese.

Acromaticità	attributo che definisce un colore privo di tinta (ad esempio bianco, grigio, nero)
Brillanza (<i>Brightness</i>)	attributo che definisce la quantità totale di luce che appare emessa da una fonte luminosa.
CIE	<i>Commission Internationale de l'Eclairage</i> .
CMY	<i>Cyan</i> (Ciano), <i>Magenta</i> (Magenta), <i>Yellow</i> (Giallo). Sistema di rappresentazione dei colori utilizzato nelle stampanti a getto d'inchiostro.
Cromaticità (<i>Chromaticness</i>)	attributo della sensazione visiva descrivente le caratteristiche di tinta e saturazione.
Crominanza (<i>Chrominance</i>)	insieme dei segnali inerenti l'informazione di colore nei sistemi televisivi.
CRT	<i>Chadod Ray Tube</i> (Tubo a Raggi Catodici). Dispositivo elettronico, costituito da un tubo sottovuoto in cui uno o più fasci di elettroni sono proiettati su uno schermo per produrre un'immagine.
HSL	<i>Hue</i> (Tinta), <i>Saturation</i> (Saturazione), <i>Lightness</i> (Luminosità). Sistema di rappresentazione dei colori utilizzato in <i>Computer Graphics</i> e <i>Image Analysis</i> .
HSV	<i>Hue</i> (Tinta), <i>Saturation</i> (Saturazione), <i>Value</i> (Valore). Sistema di rappresentazione dei colori utilizzato in <i>Computer Graphics</i> e <i>Image Analysis</i> .
Illuminamento (<i>Iluminance</i>)	flusso luminoso incidente per unità di superficie.
Luminanza (<i>Luminance</i>)	grandezza fotometrica, fornisce una misura della quantità d'energia prodotta da una sorgente di luce e percepita da un osservatore.
Radianza (<i>Radiance</i>)	grandezza radiometrica, rappresenta la quantità totale d'energia che fluisce da una sorgente luminosa.
RGB	<i>Red</i> (Rosso), <i>Green</i> (Verde), <i>Blue</i> (Blu). Sistema di rappresentazione dei colori utilizzato nei televisori, nei monitor e nelle telecamere.
Saturazione (<i>Saturation</i>)	grandezza indicante il grado di purezza di un colore.
Tinta (<i>Hue</i>)	attributo in virtù del quale la sorgente luminosa (o l'oggetto riflettente la luce) è definita rossa, verde, blu, gialla, magenta, ecc.
YUV	Sistema di rappresentazione dei colori utilizzato nello standard televisivo PAL.